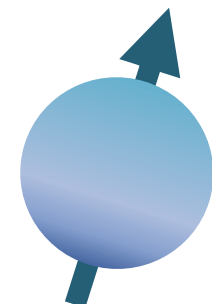


# 電子の永久電気双極子能率探索のための レーザー冷却ルビジウム原子を用いた 共存磁力計の開発

---

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター  
測定器研究部 内山愛子

# 電子の永久電気双極子能率



## EDM : Permanent Electric Dipole Moment

電子のスピン方向に沿って生じる電気双極子能率

### 標準模型(SM) :

クォークを介した高次の効果で  
電子EDM ( $d_e$ ) が発現

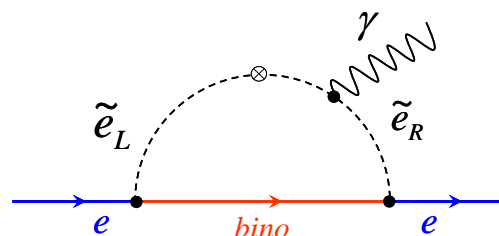
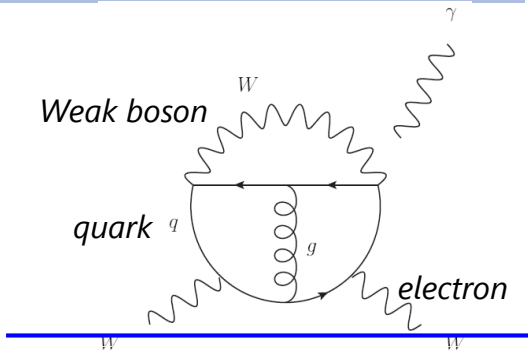
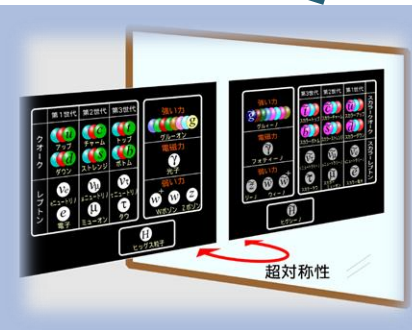
$$|d_e^{\text{SM}}| < 10^{-38} \text{ ecm}$$

M. Pospelov and A. Ritz, *Ann. Phys.*, **318** 119, (2005)

### 超対称性理論 :

統計性の異なる粒子の  
伝搬により発現

標準模型より $10^{10}$  倍  
大きい値をとり得る



## 標準模型を超えた物理モデルの検証を行う

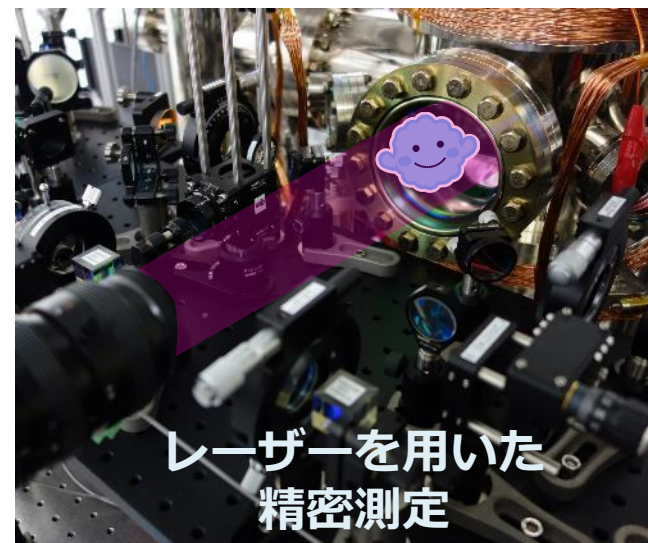
# 電子の永久電気双極子能率

**EDM** : Permanent **E**lectric **D**ipole **M**oment

電子のスピン方向に沿って生じる電気双極子能率



標準模型を超えた物理モデルの検証を行う



# Fr原子を用いた電子EDM探索



$$\text{EDM増幅率} = \frac{\text{Fr原子EDM}}{\text{電子EDM}} \sim 900$$

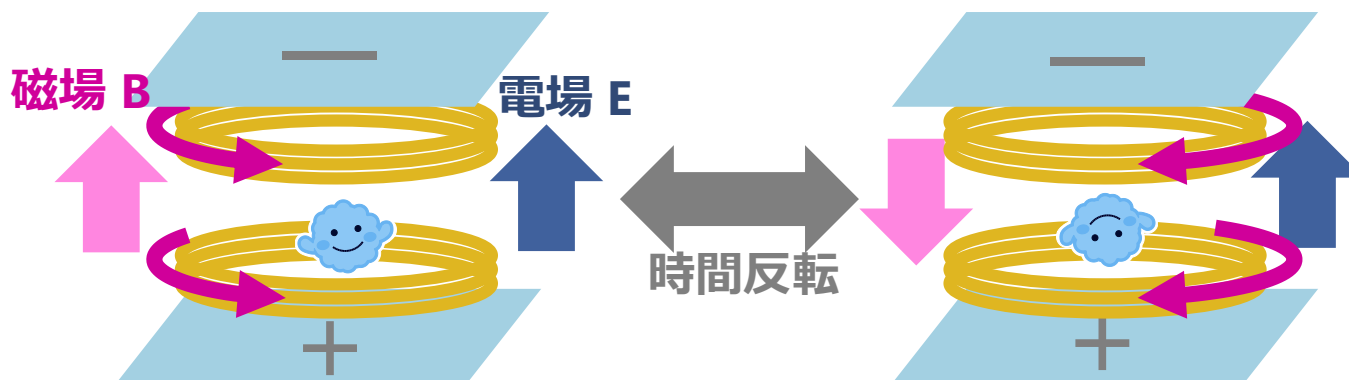
D Mukherjee, et al. *J. Phys. Chem. A* **113(45)** 12549 (2009).

レーザー冷却・トラップが可能

不安定原子 ( $^{210}\text{Fr}$  寿命 ~3分)

1	2	3
H		
Li	Be	
Na	Mg	
K	Ca	Sc
Rb	Sr	Y
Cs	Ba	57~71 ランタノイド
Fr	Ra	89~103 アクチノイド

# Fr原子を用いた電子EDM探索



$$h\nu_+ = -2m_F g_F \mu_B B_+ - 2m_F d_{\text{Fr}} E_+$$

$$h\nu_- = -2m_F g_F \mu_B B_- - 2m_F d_{\text{Fr}} E_-$$

$m_F$ : 磁気量子数,  $\mu_B$ : ボーア磁子,  $d_{\text{Fr}}$ : Fr原子EDM,  $B_+, B_-$ : 磁場,  $E_+, E_-$ : 磁場

$$h(\nu_+ - \nu_-) = -2m_F g_F \mu_B (B_+ - B_-) - 2m_F d_{\text{Fr}} (E_+ + E_-)$$

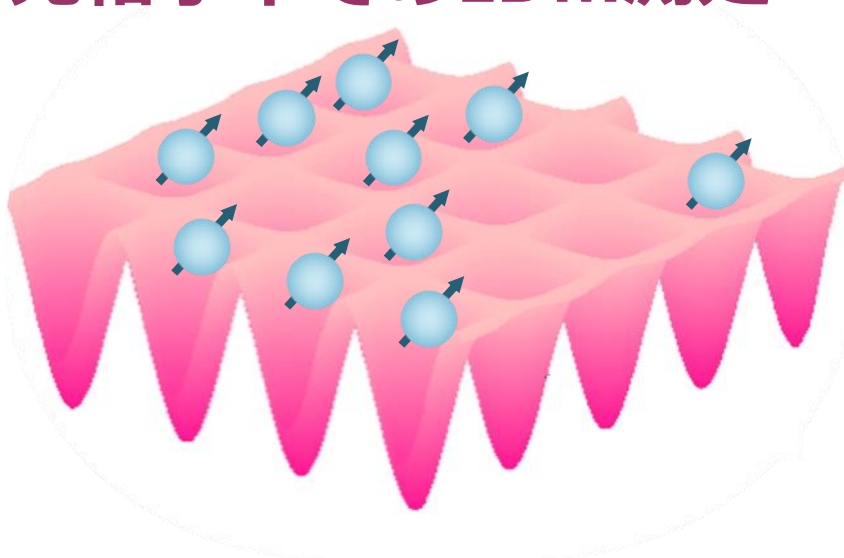
$$d_{\text{Fr}} = -\frac{h(\nu_+ - \nu_-) + 2m_F g_F \mu_B (B_+ - B_-)}{2m_F (E_+ + E_-)}$$

# Fr原子を用いた電子EDM探索

$$d_{\text{Fr}} = - \frac{h(\nu_+ - \nu_-) + 2m_F g_F \mu_B (B_+ - B_-)}{2m_F (E_+ + E_-)}$$

- 長い相互作用時間  $\sim 1 \text{ sec}$
- 高精度周波数測定  $\sim 0.1 \text{ mHz}$
- 高電場印加  $\sim 100 \text{ kV/cm}$
- 磁場の精密測定  $\sim 10 \text{ fT}$

## 光格子中でのEDM測定



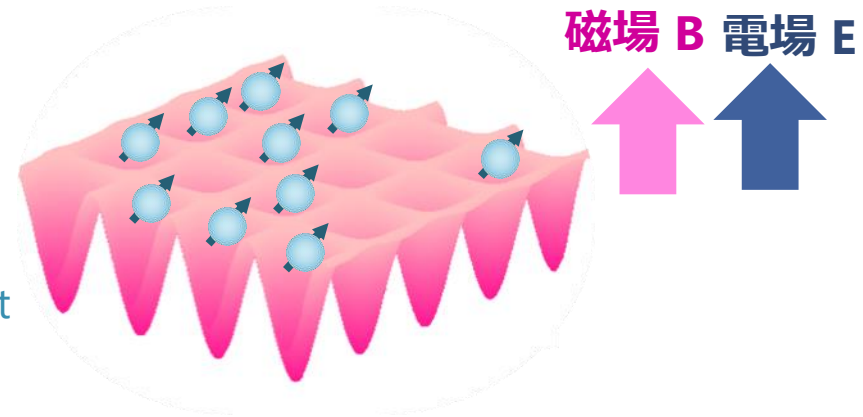
# 光格子中での原子のエネルギーシフト

$$\Delta\epsilon =$$

$$-\frac{1}{4}\alpha_S^{\text{AC}} E_\omega^2: \text{AC scalar stark shift ( = } U)$$

$$-\frac{1}{4}\alpha_V^{\text{AC}} \frac{m_F}{2J} E_\omega^2 (i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e}: \text{AC vector stark shift}$$

$$-\frac{1}{4}\alpha_T^{\text{AC}} \frac{3m_F^2 - J(J+1)}{J(2J-1)} \cdot \frac{3|\epsilon_z| - 1}{2} E_\omega^2: \text{AC tensor stark shift}$$



M. Auzinsh et al.,  
Optically Polarized Atoms (2009)

$\alpha_S^{\text{AC}}, \alpha_V^{\text{AC}}, \alpha_T^{\text{AC}}$ : 分極率,  $E_\omega$ : 光の電場振幅,  $U$ : ポテンシャル深さ,  $J$ : 電子の全角運動量,  $m_F$ : 磁気量子数  
 $\epsilon$ : 偏光ベクトル,  $\mathbf{e}$ : 量子化軸方向の単位ベクトル

光が円偏光のときのみ生じる

$$h\nu = \Delta\epsilon_1(F_1, m_{F_1}) - \Delta\epsilon_2(F_1, -m_{F_1}) = -2m_F \alpha_{\text{eff}} U (i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e}$$

$$= -2m_F g_F \mu_B B - 2m_F \alpha_{\text{eff}} U (i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e} - 2m_F d_{\text{Fr}} E$$

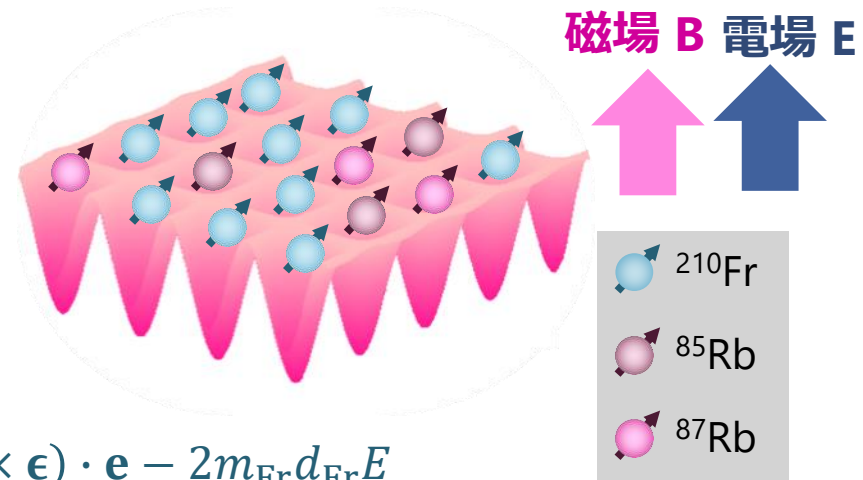
静磁場

光による有効磁場

EDM

# $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ を用いた光格子共存磁力計

$$\begin{aligned}
 h\nu &= \Delta\epsilon_1(F_1, m_{F_1}) - \Delta\epsilon_2(F_1, -m_{F_1}) \\
 &= -2m_F g_F \mu_B B \\
 &\quad - 2m_F \alpha_{\text{eff}} U(i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e} \\
 &\quad - 2m_F d_{\text{Fr}} E
 \end{aligned}$$



$$h\nu_{\text{Fr}} = -2m_{\text{Fr}} g_{\text{Fr}} \mu_B B - 2m_{\text{Fr}} \alpha_{\text{eff}}(\text{Fr}) U(i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e} - 2m_{\text{Fr}} d_{\text{Fr}} E$$

$$h\nu_{85} = -2m_{85} g_{85} \mu_B B - 2m_{85} \alpha'_{\text{eff}}(^{85}\text{Rb}) U(i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e} - 2m_{85} d_{85} E$$

$$h\nu_{87} = -2m_{87} g_{87} \mu_B B - 2m_{87} \alpha'_{\text{eff}}(^{87}\text{Rb}) U(i\epsilon^* \times \epsilon) \cdot \mathbf{e} - 2m_{87} d_{87} E$$

**静磁場 と 光による有効磁場 を同時に測定**

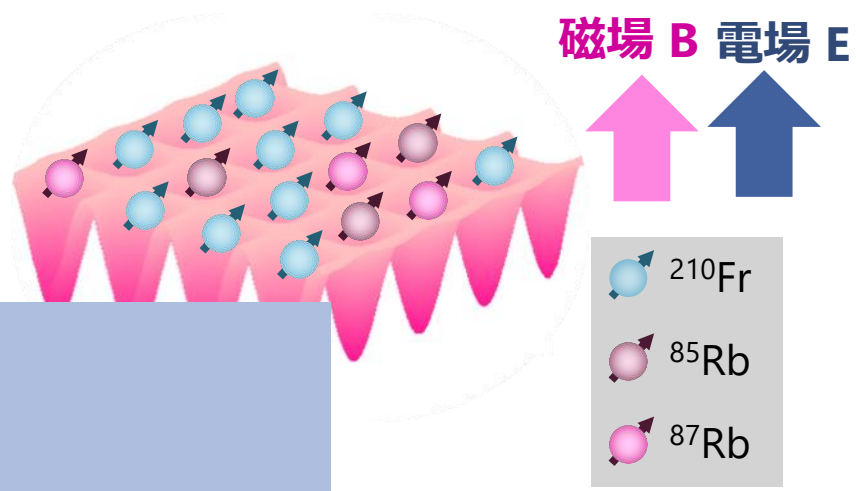
$$\alpha'_{\text{eff}}(\text{Rb}) = \alpha_{\text{eff}}(\text{Rb}) \frac{\alpha_S^{\text{AC}}(\text{Rb})}{\alpha_S^{\text{AC}}(\text{Fr})}$$



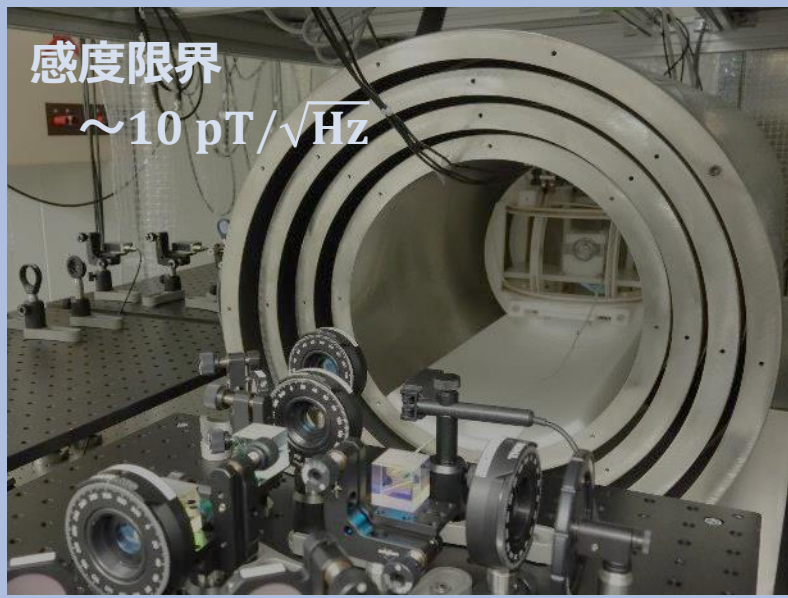
# 85Rbと87Rbを用いた光格子共存磁力計

85Rbと87Rbの同時トラップ

85Rbと87Rbによる磁場測定



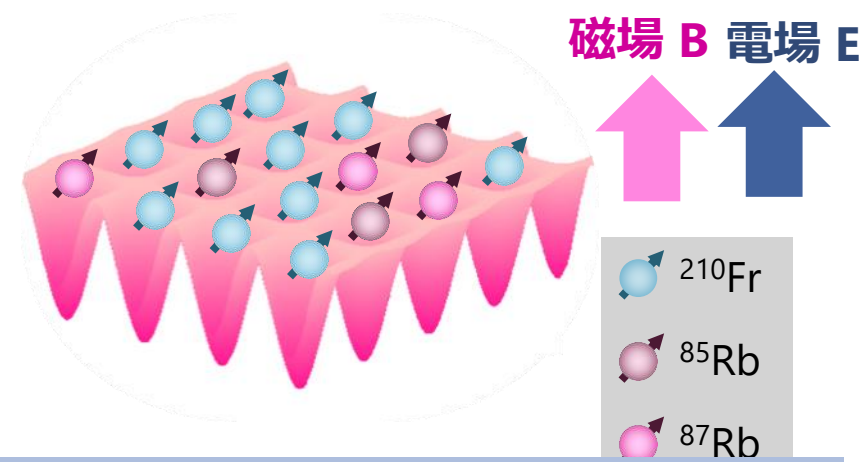
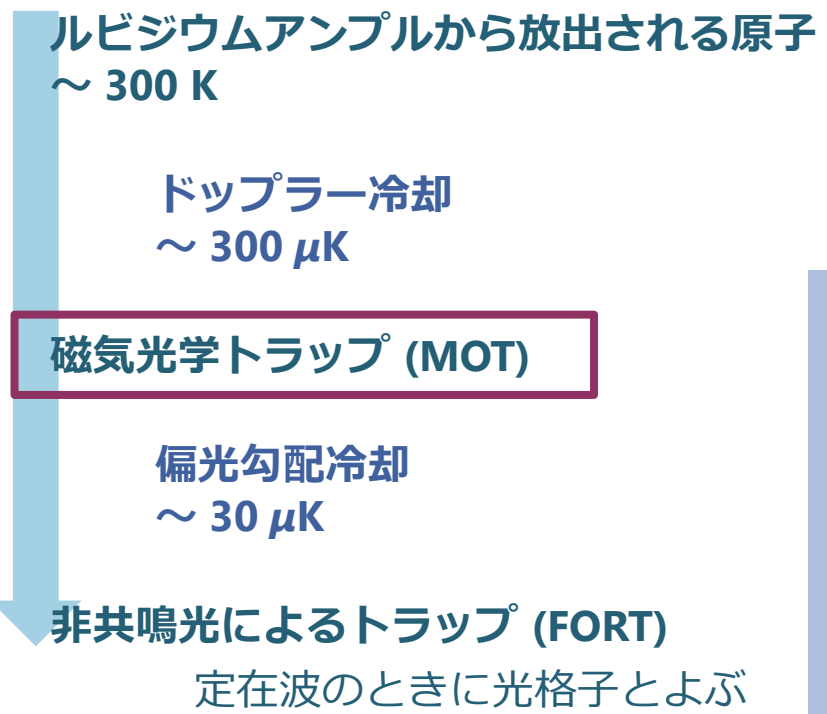
## ルビジウム蒸気セルを用いた磁力計



ルビジウムセル (パラフィンコーティング)

# $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ を用いた光格子共存磁力計

## $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ の同時トラップ



### $^{87}\text{Rb}$ を用いたトラップの開発

MOT  $\sim 10^9$ 個

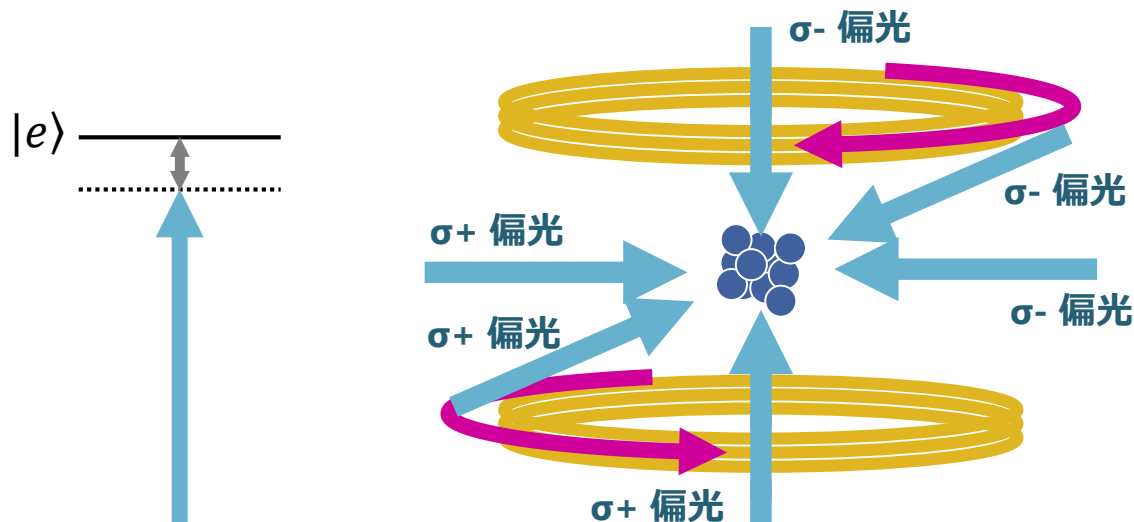
FORT  $\sim 10^6$ 個  
2.5 mm

修士論文 坂本幸祐 (2017) 東北大学

# 磁気光学トラップ(MOT)

## ドップラー冷却

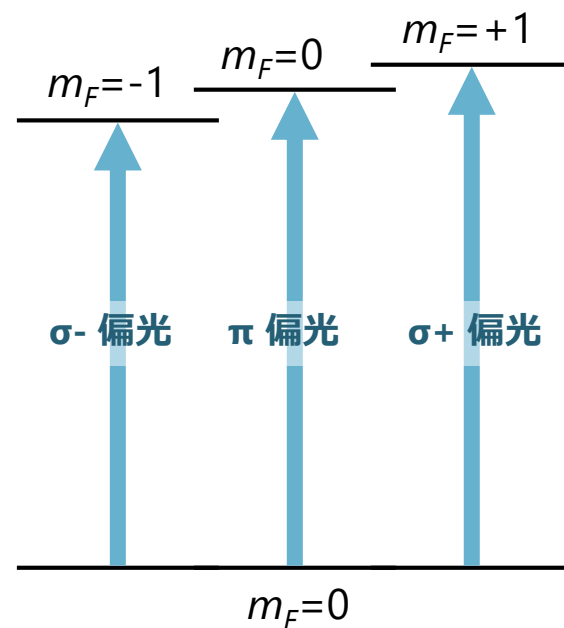
光の周波数を原子の共鳴周波数から負に離調



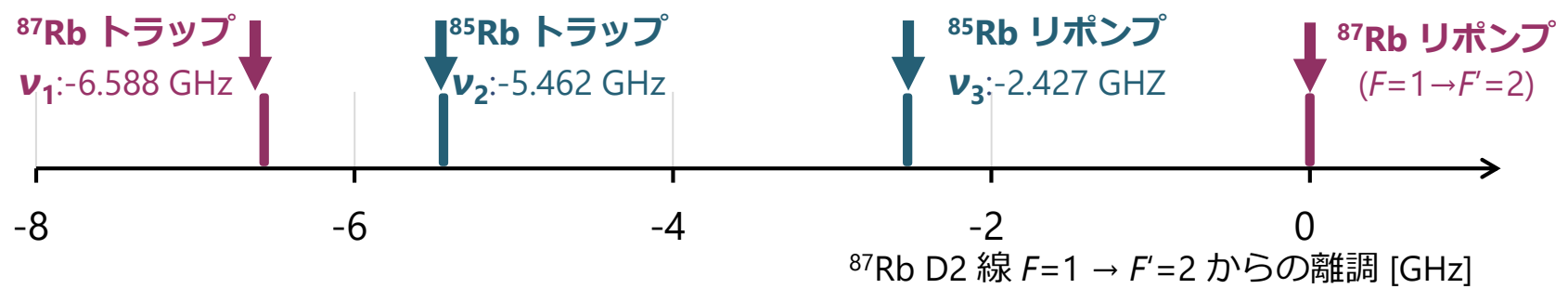
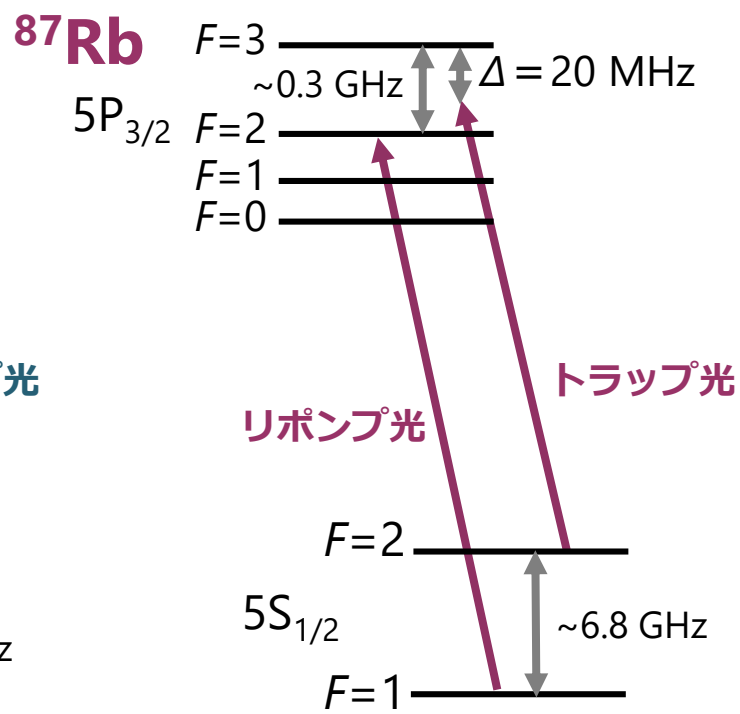
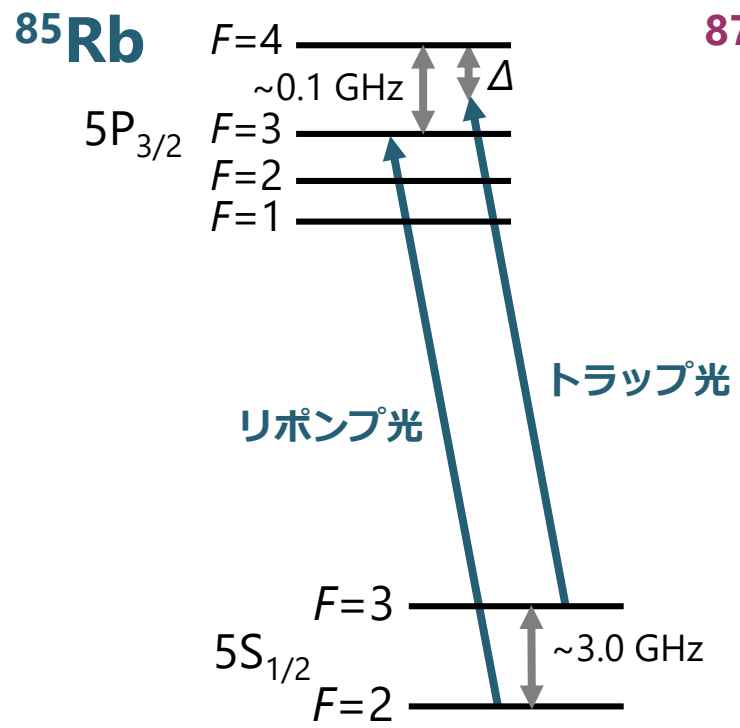
原子を冷却し捕獲する

## 磁場による復元力

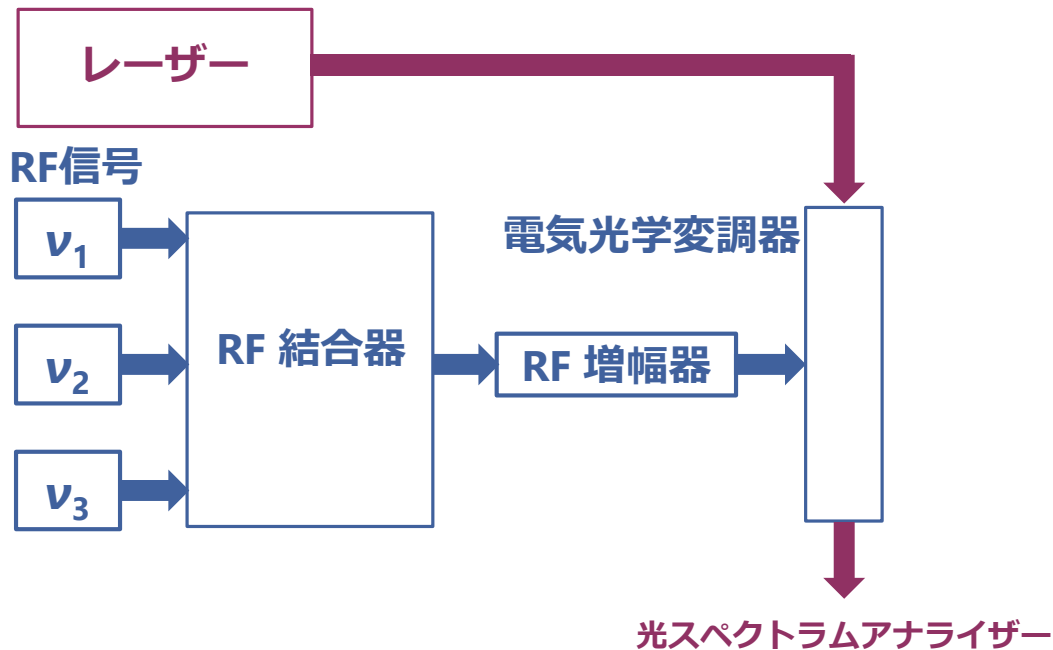
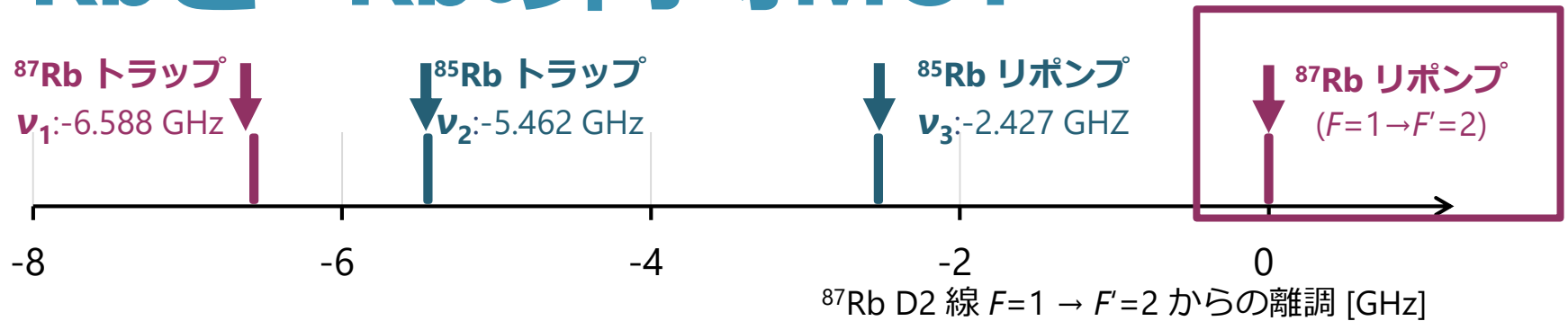
四重極磁場と光の偏光の選択則



# 85Rbと87Rbの同時MOT

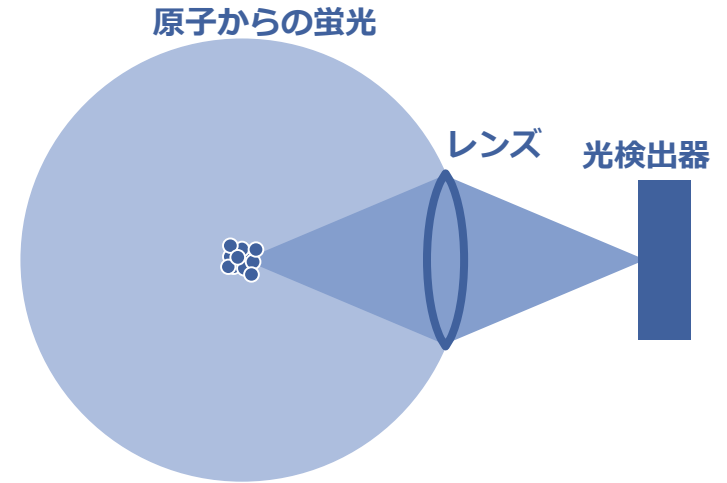


# $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ の同時MOT



# $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ の同時MOT

$^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ の同時MOTに成功！



## 今後の課題

トラップ個数を増やす

個数の安定化

偏光勾配冷却

# まとめ

電子EDMをFr原子を用いて探索することを計画している

光格子中でのEDM探索で問題となるベクトル光シフトを測定する

ために $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ を用いた光格子共存磁力計の開発を進めている

今回 $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ の同時MOTに成功した